CN 53-1189/**P** **ISSN** 1672-7673

NVST 终端仪器消旋平台载荷形变研究*

梁 昱[1,2]，李正刚[1,3]，许 骏[1,3]

(1. 中国科学院云南天文台，云南 昆明 650011；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 中国科学院天文大科学研究中心，北京 100012)

摘要：研究了 1 m 新真空太阳望远镜(New Vacuum Solar Telescope，NVST)终端仪器消旋平台上平台的载荷形变情况。利用检测激光光斑在 CCD 探测器上的位移探测微小的形变。实验时，激光光源固定在稳定区域指向被测区域 CCD 探测器。通过质心算法计算 CCD 探测器靶面光斑质心数据，质心的变化量反映测量被测区域的形变量，仅研究重力方向的形变。通过多组实验及 ANSYS 仿真发现：上平台的 3 个悬臂边缘位置在旋转至 80°~200°区域出现的正、反转重力方向形变的明显不一致问题很大程度由驱动平面和轴承定位平面不一致及正、反转滚轮组不严格指向转台中心两个因素共同作用引起；3 个悬臂中，一个悬臂在多个转动区域形变明显且对载荷敏感，一个悬臂部分区域对载荷敏感，均主要由于其与转台中心连接刚度较差引起。

关键词：消旋平台形变；质心算法；1 m 新真空太阳望远镜

中图分类号：TH741 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673(2017)04-0511-08

望远镜位置固定的内史密斯(Nasmyth)焦点或库德(Coude)焦点，都存在视场旋转的问题。观测单个点源时，旋转相对较小，但如果观测目标为面源，则要让被测对象在焦面上相对于探测器的位置固定[1]。为抵消像场旋转，通常需要通过硬件或软件方式消旋。目前消旋方法主要有 3 类：后端仪器平台转动消旋、光学器件消旋及后期图像处理消旋[2-5]。

太阳是距离地球最近的恒星，主导着日地空间关系[6]。作为研究太阳物理不可或缺的科研装置，现役地平式太阳望远镜中，只有 1 m 太阳望远镜采用平台方式消旋，见表 1。我国预研中的中国大型太阳望远镜(Chinese Large Solar Telescope，CLST)、中国巨型太阳望远镜(Chinese Giant Solar Telescope，CGST)则都考虑采用平台方式消旋[6-7]。

表 1 全球主要太阳望远镜消旋方式[8-14]

Table 1 The derotator method of mainstream solar telescope

望远镜	机架形式	口径/m	消旋方式	望远镜	机架形式	口径/m	消旋方式
NST	赤道式	1.6	后期数据处理	McMATH	赤道式	2.03	光学器件消旋
SST	地平式	1	数据处理消旋	ATST/预研	地平式	4	平台消旋/16.5 m
NVST	地平式	1	平台消旋/6 m	EST	地平式	4	光学器件消旋
GREGOR	地平式	1.5	光学器件消旋	CLST/预研	地平式	1.8	平台消旋/9 m
THEMIS	地平式	0.9	光学器件消旋	CGST/预研	地平式	8	待定/三层平台

布局在消旋平台上的后端仪器的精度对成像观测至关重要。目前还未见关于大型太阳望远镜消旋平台形变的相关研究工作。本文采用光源指向探测器，利用检测探测器靶面质心变化量计算被测区域

* 基金项目：国家自然科学基金 (11473067) 资助.
收稿日期：2017-02-18；修订日期：2017-03-06
作者简介：梁 昱，男，硕士. 研究方向：光机仪器设计，太阳磁场测量仪器. Email：yliang@ynao.ac.cn

形变量的方法对 1 m 太阳望远镜消旋平台上平台载荷形变问题进行了研究。该工作不仅有助于对现有仪器的工作环境进行评估，为后续仪器的装调提供有力参考，也可为我国后续研发的大型望远镜的旋转平台积累设计经验。

1 研究方法

1.1 悬臂及节点约定

1 m 太阳望远镜的后端仪器布局在消旋平台上，成像通道布局在上平台，见图 1。本文坐标系约定：X 轴为重力方向；Y 轴为水平方向(与转台外径相切)；Z 轴为水平方向(径向指向中心)。平台旋转位置约定悬臂 1 位置为 0°，2 为 90°，3 为 180°，依次类推。

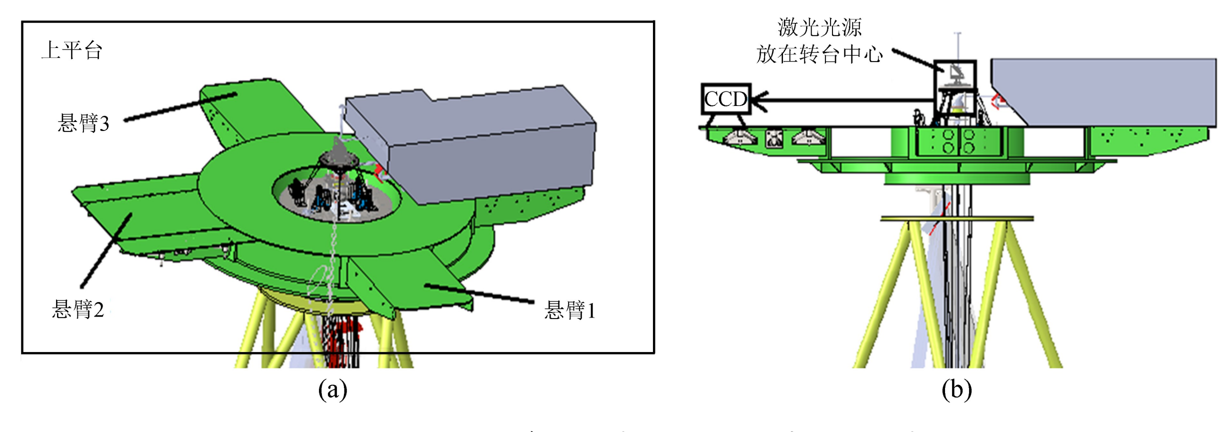


图 1 (a) 上平台悬臂位置示意；(b) 上平台实验位置示意

Fig. 1 (a) Position of cantilevers on upper platform; (b) Experiment position on derotator platform

1.2 研究内容

布局在 1 m 太阳望远镜上平台悬臂 4 的自适应光学系统的承载约为 2 000 千克，且自适应光学系统工况稳定。这个承载量已经超出普通光路光学器件的总重，对于悬臂的承载本文不做进一步讨论。作为太阳望远镜的光学消旋平台，相对于承载，其动态稳定性更为关键，故本文仅研究上平台载荷形变的稳定性。

具体内容为：X 轴平台静止时，上平台 3 个悬臂不同位置加载的静态质心数据；平台转动时 3 个悬臂在多工况下正、反转的动态质心数据，见表 2。Y 轴、Z 轴未研究，理由如下：

(1) Y 轴刚度较好，冲击载荷下仅 8 μm 的响应，见图 1(b)，Y 轴形变对终端仪器的影响可忽略；

(2) Z 轴为光路非敏感方向，只影响光轴方向焦面位置，主要受离心力影响。1 m 太阳望远镜所处位置的像场最大旋转速度为 1 446 ″/s [15]，仿真中采用转速 1 570 ″/s 分析离心力水平方向形变为 0.12 nm，对像质影响不大。1 m 太阳望远镜一天内的正常调节量在 1 mm 左右，Z 轴形变可忽略。

表 2 实验采集内容

Table 2 Contents of experiment data

	数据类型	采集内容	目的	备注
上平台	静态数据	不同角度质心	分析离散位置的质心	每隔 30°采集一组数据
		不同角度加载质心	分析离散位置质心的载荷影响	
	动态数据	正、反转质心	分析连续变化质心数据	多种工况的形变
		正转、快速复位质心	分析速度影响	
		正、反转加载质心	分析载荷影响	
		正、反转无拖线质心	分析拖线影响	

1.3　形变采集原理

利用检测激光光斑在 CCD 探测器上的位移探测大型结构形变，通过探测器靶面光斑质心变化量计算被测区域形变量。由于悬臂 4 被 AO 占用，本文只采集悬臂 1~3 的数据，光源固定在转台中心，探测器固定在距中心 2.5 m 的边缘被测区。增加减光片减小光强，防止 CCD 损坏。

实验仪器如下：

激光器：MRL-III-671-50 mW/长春新产业光电技术有限公司

CCD：pco. 4 000 分辨率：2 672 × 4 008/pco

减光片：UPAM OD4/成都超纯科技有限公司

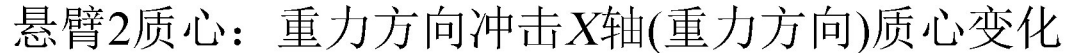
1.4　采集方法的可行性

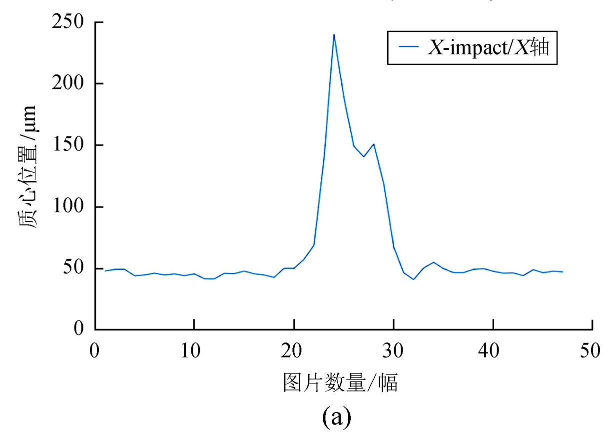
考虑光源稳定性等背景噪声影响，采集平台静止 40 ms 和 100 ms 不同曝光时间质心变化的数据，曝光影响在一个像素(9 μm)左右，见表 3。实际采集均采用 100 ms 曝光，形变数据标准差小于 7 μm，符合信噪比要求。为验证实验方法的灵敏性，人为推动消旋平台悬臂 2 的 *X* 轴重力方向和 *Y* 轴水平方向，检验悬臂对于冲击载荷的敏感性，信号灵敏性符合要求。*X* 轴的响应远大于 *Y* 轴响应，见图 2，其中，纵轴表示质心相对变化量，后文类似。

表 3　实验用激光器光束稳定性

Table 3　Stability of laser beam for experiment

X 轴/重力方向		悬臂 1 /μm	悬臂 2 /μm	悬臂 3 /μm
曝光差值 40 ms/100 ms		1.59	2.86	11.5
各数据标准差 /STD	40 ms	6.228	0.813 6	8.564 4
	100 ms	4.319 1	0.988 2	6.243 3





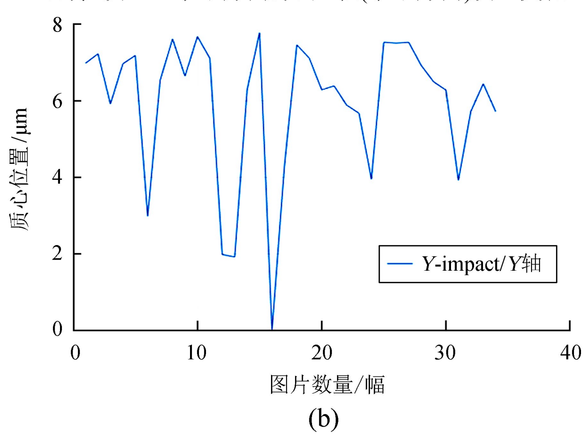


图 2　(a) 手推重力方向 *X* 轴响应/峰值 200 μm；(b) 手推水平方向 *Y* 轴响应/峰值 8 μm

Fig. 2　(a) The response of *X* axis when push at *X* axis/Peak value: 200μm; (b) The response of *Y* axis when push at *Y* axis/Peak value: 8μm

1.5　数据预处理

采集的文件是 FITS 文件，分辨率为 2 672 × 4 008。实际激光光斑较小且质心位置的变化不大。为提高计算效率，截取 1 000 × 1 000 像元进行处理；为提高信噪比，进行了噪声滤波，具体参数根据每组 FITS 文件中的光斑位置、背景噪声确定，最后计算光斑质心数据。

2　数据分析

3 个悬臂实验内容相同：(1)不同角度的质心静态数据；(2)综合考虑 1 m 太阳望远镜的消旋平台的具体工况，为分析速度、拖线、载荷的影响，采集了多个工况 3 个悬臂正、反转的动态数据。另外，为分析驱动力影响，模拟悬臂 1 在整个旋转过程中的质心变化趋势进行力学仿真，讨论了悬臂 80°~200°区域出现明显的正、反转形变不一致问题。

2.1 静态数据

3 个悬臂每隔 30°采集一组悬臂静态形变数据取均值绘图，除悬臂 3 的 30°、120°两组数据，其余数据加载前后悬臂形变变化趋势符合良好，见图 3、表 4。对悬臂 1 的工况，利用 ANSYS 进行力学仿真，悬臂边缘加载 70 kg 载荷，加载形变为 288 μm，与实际测量 315 μm 相近。

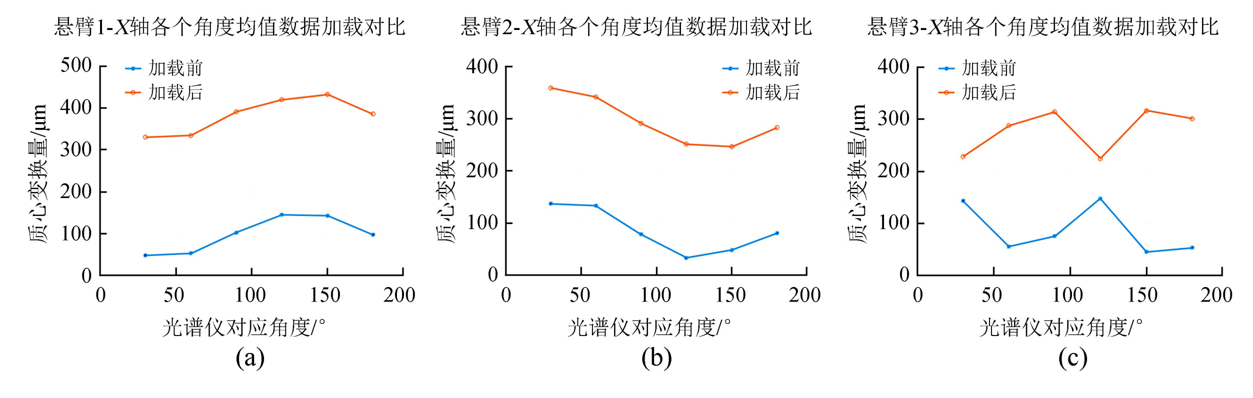


图 3 3 个悬臂不同角度及加载 CCD 光斑质心数据

Fig. 3 The centroid data when offload and on load of each cantilever in different angles

表 4 3 个悬臂在不同角度加载质心变化均值

Table 4 The mean data of centroid variation in each cantilever when load and offload

变化方向	悬臂 1/μm	悬臂 2/μm	悬臂 3/μm	悬臂 3 排除 30°、120°
X 轴	315	216	191.46	246.744 2 μm

注：加载为 70 kg 载荷添加在悬臂边缘。

2.2 动态数据

1 m 太阳望远镜光谱平台仪可实现 0°～210°范围的旋转。实际可叠加 3 个悬臂工况反应整个平台旋转过程中的工况。将悬臂 2 的质心数据第 1 个点与悬臂 1 的 90°坐标的质心数据点叠加，悬臂 3 第 1 个质心数据与悬臂 1 的 180°点叠加。如图 4(a)。横轴为平台旋转位置，纵轴为重力方向质心位置。3 个悬臂独立实验，纵轴数据根据 90°、180°悬臂交接处数据叠加到一起，表示质心变化相对量。实际采集过程中手动控制采集及转台转动，非严格在 90°、180°叠加。

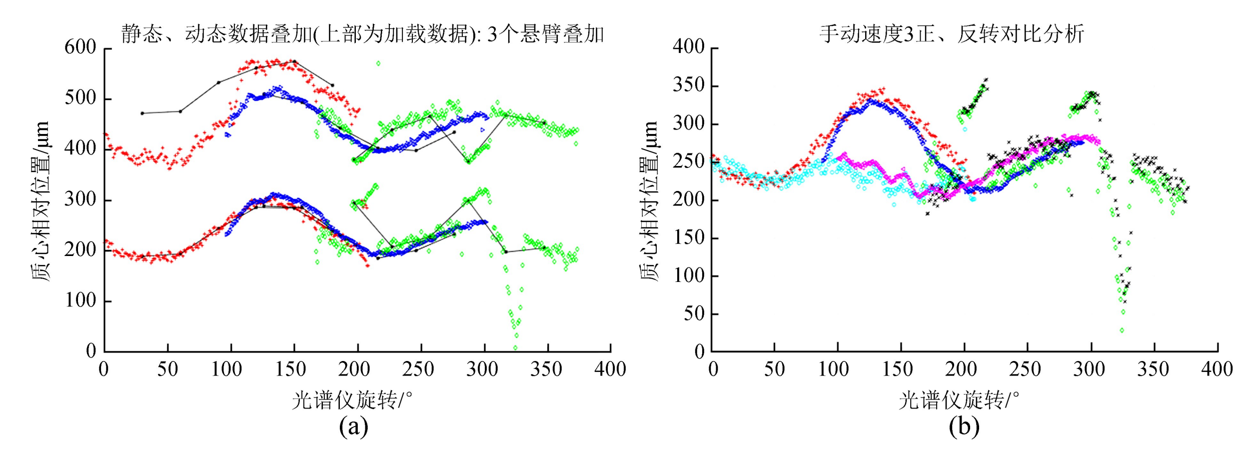


图 4 (a) 正转：静态、动态数据叠加（上部为加载数据）；(b) 正、反转数据对比分析

Fig. 4 (a) Forward data: Superposition of static data and dynamic data (upper data represent on load);
(b) Comparative analysis of forward and reverse rotating of platform

注：图 4(a)中，+ 为悬臂 1 正转数据；> 为悬臂 2 正转数据；◆为悬臂 3 正转数据；图 4(b)中，+、>、◆表示与图 4(a)一致，o 为悬臂 1 的反转数据；< 为悬臂 2 反转数据；×为悬臂 3 反转数据。

考虑到影响平台形变的因素主要含驱动力、平台转速、平台拖线(目前消旋平台转动时线缆会拖拽移动，有一定阻力)、载荷等主要因素。分别采集 3 个悬臂在消旋平台旋转过程中正、反转；正转、快速复位；正、反转排除拖线干扰；含载荷正、反转的动态数据。证实除载荷外，拖线及速度对实验结果几乎无影响，见图 5。

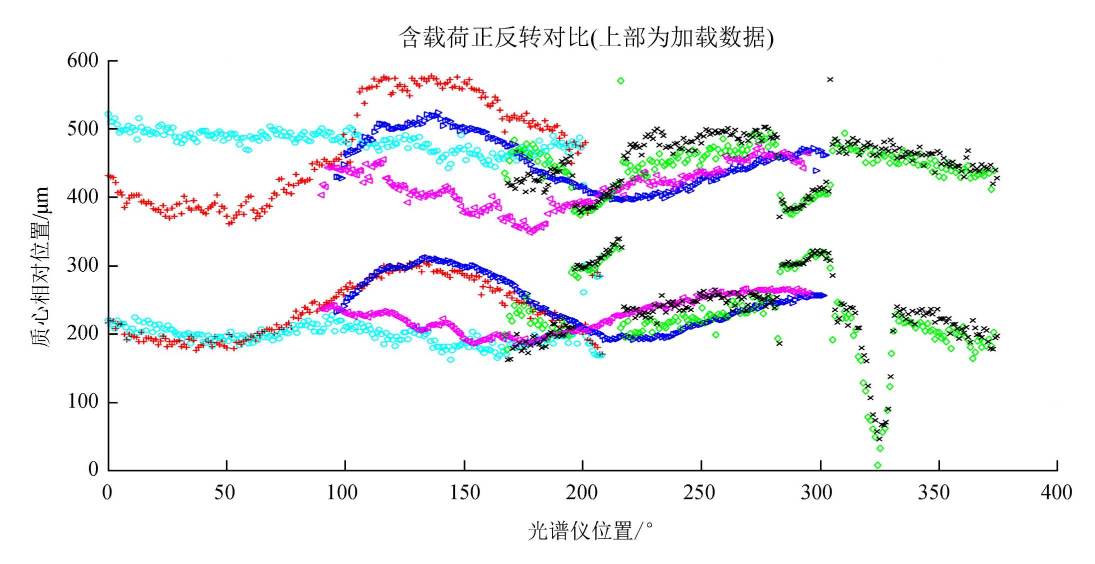


图 5　正反转载荷影响对比(上部为加载)

Fig. 5　Load effect of derotator platform when forward and reverse (Upper represent on load)

注：+ 为悬臂 1 正转数据；>为悬臂 2 正转数据；◆为悬臂 3 正转数据；o 为悬臂 1 的反转数据；<为悬臂 2 反转数据；×为悬臂 3 反转数据。

2.3　驱动力影响的仿真数据

1 m 太阳望远镜的平台转动通过布局在悬臂 2、3 之间的滚轮 1 及布局在悬臂 3、4 之间的滚轮 2 驱动，见图 6(a)。由于装配间隙、环境温度等因素，滚轮存在径向指向圆心或远离圆心的分力。如图 6(b)，望远镜上平台驱动面和定位面不共面，两个平面的距离即提供了作用力臂，滚轮的驱动力存在径向分力，力和力臂共同作用产生绕水平轴的扭转力矩，该力矩最终导致悬臂重力方向的形变。

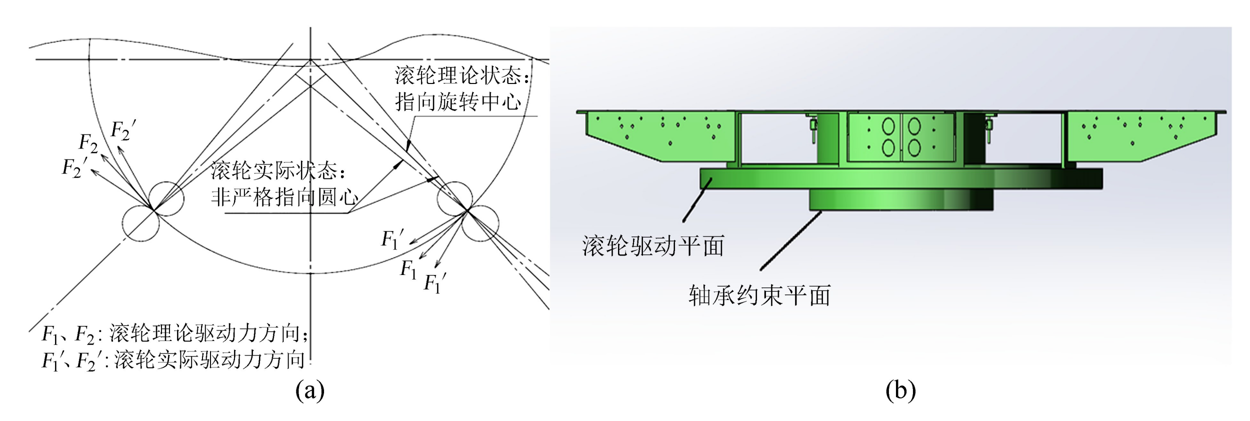


图 6　(a) 实际滚轮径向分力示意图；(b) 上平台定位及驱动面示意图

Fig. 6　(a) Schematic diagram of the roller radial component of drive force;
(b) Schematic diagram of fix position and driving position

考虑悬臂 2 实际工况布局有大量仪器，其质量、位置布局参数不详，无法进行可靠仿真，悬臂 3 质心不稳定(见图 4、5)，故模拟悬臂 1 的工况进行力学仿真：设定上平台静止，通过滚轮位置移动一定的角度模拟平台转到相同角度的状态。如图 7(a)，滚轮实际布局位置为 0°的状态。两对滚轮指向或远离圆心的径向分力可以两两组合为 4 种情况，仿真 4 种情况的悬臂 1 质心变化趋势见图 7(b)。

由图 7 可知，当正转滚轮 1 远离，滚轮 2 指向圆心；反转滚轮 1 指向，滚轮 2 远离圆心时，悬臂 1 实验数据中 80°～200°区域的正、反转形变不一致和仿真数据变化趋势较吻合，见图 8，0°～80°区域由于多种因素作用此处不做讨论。推断如下：80°～200°区域的正、反转形变不一致主要由两方面引起：(1)驱动力与轴承固定平面不一致，驱动力的径向分量产生额外的扭转力矩，该力矩产生的应力导致悬臂的应变变形；(2)实际正、反转的滚轮不同工作状态径向分力的方向相反(指向或远离转台中心)，即产生形变的正、反转不一致。

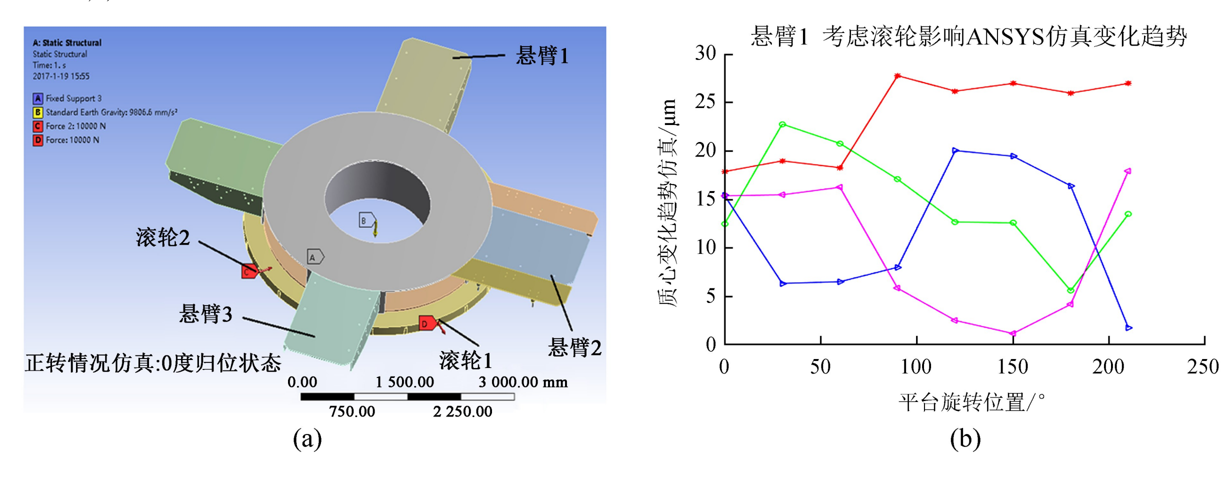


图 7 (a) 滚轮位置变化模拟平台转动；(b) 仿真结果

Fig. 7 (a) Simulation of platform rotation with the roller positon change; (b) Simulation results

注：图 7(b)✻表示两个滚轮径向力指向远离圆心；○表示两个滚轮径向力指向圆心；▶表示滚轮 1 远离，滚轮 2 指向圆心；◀表示滚轮 1 指向，滚轮 2 远离圆心。

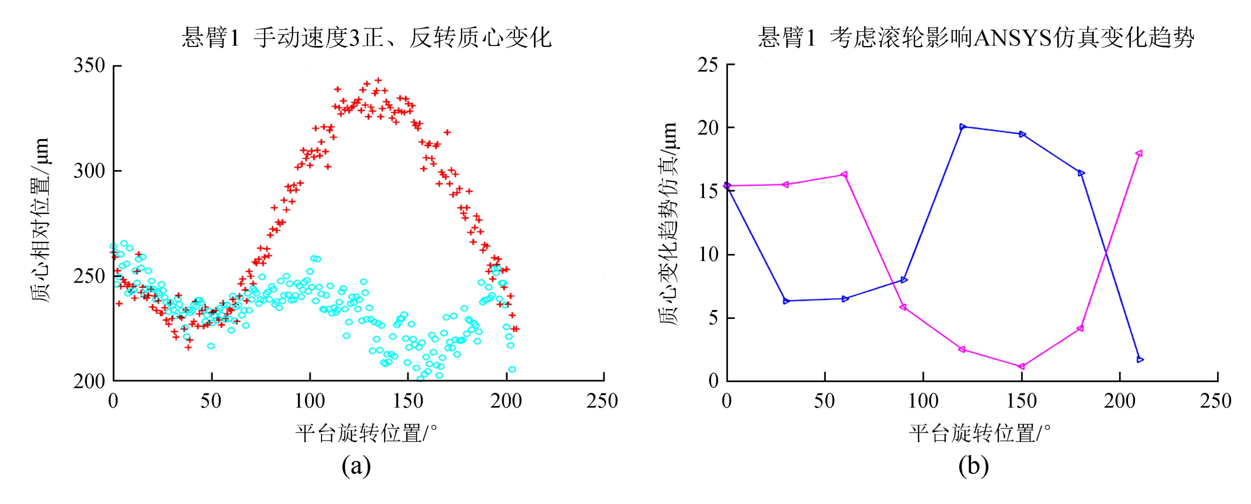


图 8 (a) 实际采集的质心变化趋势；(b) ANSYS 仿真驱动力影响的质心变化趋势

Fig. 8 (a) Centroid variation trend collected by experiment; (b) Centroid variation trend affected by drive collected by ANSYS simulation

注：图 8(a)中“+”为悬臂 1 正转数据；“o”为悬臂 1 的反转动态数据；图 8(b)中▶表示滚轮 1 远离，◀表示滚轮 1 指向。

2.4 上平台形变数据综合分析

(1)图 3、表 4 可知，除悬臂 1 的 0°～100°、悬臂 3 的 210°、300°附近区域，3 个悬臂加载前后变化趋势符合良好。由图 4(a)可知，除悬臂 1 加载后 0°～100°区域静、动态数据符合较差，平台旋转大部分区域 3 个悬臂静态、动态质心数据及变化趋势叠加良好，图 8(a)、(b)对比实验与仿真亦在 0°～80°区域出现偏差，推断载荷、驱动力等因素共同作用影响了悬臂 1 的 0°～100°区域的应力应变，

悬臂 1 对载荷敏感。悬臂 3 质心变化峰值 250 μm，在一定区域出现了一定的冲击载荷，195°～215°，285°～305°区域变化趋势异常在多组实验中重复出现，300°～330°质心变化加载后消失，考虑悬臂 3 相对悬臂 1、2 质心变化较大，存在冲击载荷且受重力影响，可以推测其与转台连接刚度较差，对重力载荷敏感，对于悬臂 3 在多个区间的质心异常问题，排除驱动力、拖线、速度等因素，本文推断原因为悬臂 3 与转台中心连接刚度较差，不再做进一步讨论。

(2) 由表 3、图 4(a)、图 5 可知，3 个悬臂加载 70 kg 载荷存在 200～300 μm 的形变。载荷对于质心变化有一定影响，但与悬臂刚度条件密切相关，悬臂 1～3 对于载荷的敏感性不同，加载变化量悬臂 1 > 3 > 2，所以出现 3 个悬臂未加载叠加性较好，加载后叠加混乱的现象(纵轴是质心变化的相对量)。3 个悬臂上实际布局的仪器等载荷 2 > 3 > 1，可认为是含预应力的载荷形变，刚度 2 > 3 > 1，与实验一致。综合考虑 3 个悬臂稳定性、刚度、载荷敏感性等因素，上平台仪器布局建议优先悬臂 2，其次 1、3。

(3) 由图 8 可知，对于重复出现的悬臂在 80°～200°区域正、反转质心不一致问题。通过多组实验排除拖线、速度等其他因素影响，载荷会有一定影响，但相对较小。通过 ANSYS 仿真悬臂 1 的工况推断：悬臂在 80°～200°区域正、反转质心不一致问题很大程度由驱动平面和轴承定位平面不一致及正、反转滚轮驱动力的径向分力方向相反共同作用引起。

3　总　结

上平台是 1 m 太阳望远镜光学成像通道的布局位置，对于高分辨成像极为重要。例如，望远镜的 6563 通道 250 μm 的形变相当于 CCD 靶面上接近 30 个像素的漂移，极大影响成像质量。本文通过搭建激光光源指向探测器的简易光路，采集了望远镜消旋平台多个工况的形变数据，发现上平台 3 个悬臂在转台 80°～200°区域明显出现峰值 110 μm 的形变正、反转的不一致；悬臂 3 对于载荷敏感，消旋过程中出现峰值 250 μm 左右的形变，载荷对悬臂 1 的 0°～100°区域有一定的影响。通过多组实验及 ANSYS 仿真，分析定位了产生上平台正、反转形变不一致，悬臂 3 的工况较差，悬臂 1 连接刚度差等问题的主要原因，为后续的仪器装调及平台改进工作提供了有力参考。

参考文献：

[1]　谭徽松，李银柱，金振宇. 实测天体物理 [M]. 北京：国防工业出版社，2014：22-30.

[2]　Goode P R, Denker C J, Didkovsky L I, et al. 1.6m Solar Telescope in Big Bear-THE NST [J]. Journal of the Korean Astronomical Society, 2003, 36: 125-133.

[3]　Scharmer G B, Bjelksjo K, Korhonen T K, et al. The 1-meter Swedish solar telescope [C] // Keil S L, Avakyan S V. Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics: Proceedings of SPIE. 2003: 341-350.

[4]　Schmidt W, Luhe O V D, Volkmer R, et al. The 1.5 meter solar telescope GREGOR [J]. Astronomische Nachrichten, 2012, 333(9): 796-809.

[5]　Sánchez-Capuchino J, Colladosl M, Soltau D, et al. Current concept for the 4m European Solar Telescope (EST) optical design [C] // International Optical Design Conference: Proceedings of SPIE. 2010.

[6]　刘忠，邓元勇，季海生，等. 中国地基大太阳望远镜 [J]. 中国科学：物理学 力学 天文学，2012，42(12)：1282-1291.
Liu Zhong, Deng Yuanyong, Ji Haisheng, et al. Ground-based giant solar telescope of China [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2012, 42(12): 1282-1291.

[7]　Rao Changhui, Gu Naiting, Zhu Lei, et al. 1.8-m solar telescope in China: Chinese Large Solar

Telescope [C] // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems: Proceedings of SPIE. 2015.

[8] de la Cruz Rodríguez J, Löfdahl M G, Sütterlin P, et al. CRISPRED: a data pipeline for the CRISP imaging spectropolarimeter [J]. Astronomy and Astrophysics, 2015, 573(3): 1-13.

[9] Volkmer R, Eisentrager P, Emde P, et al. Mechanical design of the solar telescope GREGOR [J]. Astronomische Nachrichten, 2012, 333(9): 816-822.

[10] Arnaud J, Mein P, Rayrole J. The solar telescope THEMIS [J]. Vistas in Astronomy, 1985, 28: 567-569.

[11] Pierce A K. The McMath solar telescope of Kitt Peak National Observatory [J]. Applied Optics, 1964, 3(3): 1337-1345.

[12] McMullina J P, Rimmelea T R, Keil S L, et al. The Advanced Technology Solar Telescope: design and early construction [C] // Ground-based and Airborne Telescopes IV: Proceedings of SPIE. 2012.

[13] Sanquirce R, Murga G, Gómez A, et al. European Solar Telescope (EST) transfer optics [C] // Ground-based and Airborne Telescopes III: Proceedings of SPIE. 2010.

[14] Colladosl M, Bettonvil F, Cavaller L, et al. European solar telescope: progress status [J]. Astronomische Nachrichten, 2010, 331(6): 615-619.

[15] 柳光乾, 付玉, 程向明. 1 m 太阳望远镜光谱仪像旋转及消旋控制 [J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊, 2012, 9(1): 86-92.
Liu Guangqian, Fu Yu, Chen Xiangming. Image-field rotation and control of counter rotation for the spectrograph of the 1m solar telescope of the Yunnan Observatory [J]. Astronomical Research & Technology——Publications of National Astronomical Observatories of China, 2012, 9(1): 86-92.

The Research of Deformation on Load about the Terminal Instruments Derotator Platform of NVST

Liang Yu[1,2], Li Zhenggang[1,3], Xu Jun[1,3]

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China, Email: yliang@ynao.ac.cn;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The deformation on load about the terminal instruments derotator platform of NVST is researched. When the upper platform is measured, the Laser light source is placed on the center of the platform and pointed to the CCD camera which is placed on the edge of the cantilever in the periphery platform. The centroid of the spot on the CCD target is computed using the centroid algorithm, whose variation presents the deformation. The deformation of gravity direction is researched. The direction of gravity is taken as X axis and the horizontal direction is taken as Y axis which is only for reference. Through multiple sets of experiments and the simulation by ANSYS, it is found that the centroid data of all cantilevers is obviously inconsistent when the derotator platform forward and reverse in the range of 80-200 degree, which is casued by the inconsistency of the drive plane and the positioning plane, and the roller group is not strictly pointing towards the center: One of the cantilevers is sensitive to the load and its rigidity is worse than others, another cantilever is sensitive to the load in some areas, while both have poor stiffness of the connection with the central turntable.

Key words: Deformation of the derotator platform; Centroid algorithm; NVST